

S235JR (1.0038) SAC MALZEMEYE UYGULANAN ISIL İŞLEMLERİN İLERİ ESNEME MİKTARINA ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Mustafa ÖZDEMİR^{a,*}, Hakan DİLİPAK^b

^{a,*} Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümü

^{b,*} Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü

Tel: 0-312-2028686 mustafaozdemir@gazi.edu.tr Ankara/TÜRKİYE

Tel: 0-312-2028686 hdilipak@gazi.edu.tr Ankara/TÜRKİYE

Özet

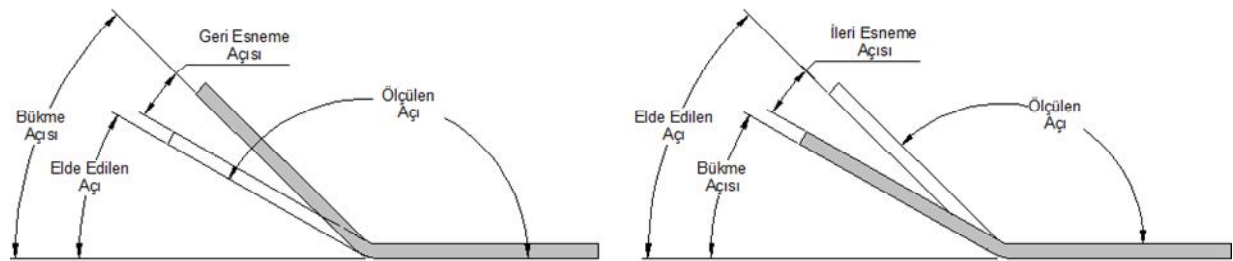
Gerçekleştirilen çalışmada, S235JR (1.0038) sac numuneler 90° lik V bükme kalıbında bükülerek, ileri esneme miktarları incelenmiştir. Deneylerde 4 mm kalınlığındaki 30x60 mm ebadındaki sac numuneler, 6 mm uçyarıçapına sahip olan zımba ile bükülmüştür. Bükme işlemlerinde deney numuneleri, ısıtılma işlemi uygulanmadan, normalize edilerek ve 10 ve 30 dk (dakika) menevişleme işlemine tabi tutularak hazırlanmıştır. Deneyler, zımba parça üzerinde 30 sn bekleyerek ve bekletilmeden direk uzaklaştırılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, numuneye uygulanan, normalizasyon işleminin ileri esneme miktarını arttırdığı, menevişleme işleminin ise azalttığı gözlenmiştir. Zımbanın numune üzerinde 30 sn bekletilmesinin, ileri esneme miktarını azalttığı tespit edilmiştir. Numune üzerine uygulanan 30 dk menevişleme süresinin, ileri esneme miktarını göz ardı edilebilecek kadar düşürdüğü tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: İleri esneme, bükme kalıpları, ısıtılma işlem

1. Giriş

Bükme, sac malzemelere uygun bir kalıp aracılığıyla bir şekil verme işlemidir. Bükme işlemlerinde, sac malzemelerde özelliklerine bağlı olarak ileri ve geri esneme meydana geldiği bilinmektedir. İleri/geri esneme miktarlarının bilinmesi, üründen elde edilecek yüksek tamlik için önemlidir. Aynı zamanda ürün için harcanan zaman ve deneme yanılma yöntemiyle kullanılan malzeme israfını da azaltmaktadır.

Bükme işleminde malzemelerin elastikiyet sınırı aşılmakta ancak akma gerilmeleri aşılamamaktadır. Bu sebepten dolayı malzeme orijinal esnekliğinin bir kısmını muhafaza etmektedir [1-3]. Malzeme üzerine uygulanan yük geri alındığı zaman malzeme eski halini almaya çalışmakta ve bükülen malzemenin bir miktar geri esnemesine (yani istenilen açıdan küçük olmasına) neden olur (Şekil 1a). Sac malzemenin istenilen açıdan daha büyük bir açı elde edilmesine ise, ileri esneme denilmektedir (Şekil 1b).



a) Geri Esneme b) İleri Esneme
Şekil 1. Geri ve ileri esnemenin tespit edilmesi

S235JR (Sıcak haddelenmiş yassı çelik) malzemeler, sıvı çeliğin sürekli döküm yöntemiyle katılaştırılması sonucu meydana gelen yarı mamul ürünün, sıcak haddehanede haddelenmesi sonucu oluşan rulo veya sac şeklindeki ürünlerdir. S235JR sac malzemeler, enerji sektöründe; kazan ve basınçlı kapların yapımında, enerji nakil hatlarında, rüzgâr enerji üretim ekipmanlarında, tarım

sektöründe; tarım makinelerinin imalatında, su, gaz ve petrol taşımalarında kullanılan boruların yapımında, suyun büyük gücünün kontrol edilmesinde, kanal, tünel, baraj, köprü, liman inşaatlarında, depolama sistemlerinde, silo ve konteynır imalatında, sıcak ve basınçlı ortamlarda, ısı eşanjörlerinin imalatında, buhar kazanları imalatında, çelik binaların yapımında vb. yerlerde kullanılmaktadır [4]. S235JR sac malzemeler yukarıda bahsedilen kullanım yerleri içerisinde yaygın olarak bükme işlemlerinde kullanılmaktadır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde, sac metal malzemelerde bükme işlemi neticesinde, meydana gelen geri ve ileri esneme fenomeni üzerinde birçok araştırmalar yapıldığı ortaya çıkmaktadır. İlk olarak, geri esneme üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, Tekaslan ve diğerleri, modüler bir V bükme kalıbı tasarlayarak, çelik sac, bakır ve paslanmaz çelik malzemelerde, zımbanın bekletilmesi ve malzeme kalınlığının geri esneme üzerine etkisini araştırmışlardır [1-3]. Ouakdi ve arkadaşları, gerdirmeli bükme işleminde kalıp radüsü ve zımbanın numune üzerinde bekletilme süresinin, geri esneme üzerindeki etkisini incelemişlerdir [5]. Sousa ve diğerleri ise, en uygun U ve V bükme kalıplarında zımba, kalıp radüsü, zımba ölçüsü ve zımba tutucu gibi parametreleri genetik algoritmayla kullanarak en uygun kalıp tasarımını gerçekleştirmişlerdir [6]. Imai ve diğerleri, V bükme kalıplarında yüksek ölçü tamlığı elde etmek için malzeme özelliklerini de dikkate alarak çalışmaları vardır [7]. Tekiner, farklı kalınlıktaki malzemelerin V bükme kalıplarında bükülmesi neticesinde oluşan geri esnemeyi incelemiştir [8]. Öztürk ve diğerleri, DP600 yüksek mukavemetli çeliğin geri esneme ve gerilmesinin incelenmesi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [9]. Leu ve Hsieh, V bükme işlemlerinde geri esnemenin azaltılması üzerinde coining force etkisinin araştırılması [10]. Choi ve Chin, yüksek mukavemetli düşük karbonlu çeliklerde geri esneme davranışının tahmini üzerine araştırmalar yapmıştır. Bu çalışmada, çok kristalli malzemenin geri esneme miktarını elastik ve visko-plastik kristal plastisite modeli kullanarak sayısal olarak tahmin etmişlerdir [11]. Schwarze ve arkadaşları, solid-shell sonlu elemanlar yöntemi kullanarak geri esneme miktarının incelenmesi üzerine matematiksel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [12]. Ötö ve Demirci, AA5754 ve AL1050 alüminyum sac malzemelerin 60°'lik V şekilli kalıpta bükerek ön gerilmelerin geri esnemeye etkisini incelemişlerdir [13]. İleri esneme üzerine yapılan çalışmalar ise, Bakhshi ve diğerleri, U ve V bükme işlemlerinde CK67 sac malzemeyi 0°, 45°, 90° haddelme yönünde kesmiş ve bükülmesi neticesinde meydana gelen geri-ileri esnemeyi araştırmışlardır [14]. Ragai ve arkadaşları çalışmalarında, sac kalınlığı, sac anizotropisi, malzeme özellikleri, sürtünme katsayısı, zımba ucu ve ölçüsünün ileri-geri esnemeye etkisini araştırmışlardır [15]. Thipprakmas ve arkadaşları, V bükme işlemlerinde, coined-bead ve taguchi tekniği kullanarak geri ve ileri esnemede bükme açısı, malzeme kalınlığı ve zımba radüsü gibi işlem parametrelerinin sonlu elemanlar yöntemi kullanarak uygun kalıp tasarımı üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır [16-18]. Branko ve diğerleri, St1403 sac malzemenin V bükme kalıplarında bükülmesi neticesinde oluşan geri-ileri esnemeyi sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir [19].

Literatür çalışmaları incelendiğinde, malzeme özellikleri ve bükme parametreleri (zımba uç yarıçapı, zımba açısı, zımba kuvveti, sac anizotropisi, haddelme yönü, vb.), ileri esnemenin tahmin edilmesini zorlaştıran etkenler olduğu belirlenmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada, 4 mm kalınlığındaki S235JR (1.0038) numuneler, zımba uç yarıçapı 6 mm kalıp ile bükülmesi neticesinde, ortaya çıkan ileri esneme miktarları belirlenmiştir. Bunun yanında, literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak, numuneye uygulanan normalize ve menevişleme işleminin ileri esnemeye olan etkileri araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Deneylerde 4 mm kalınlığında ve kimyasal bileşimi Çizelge 1'de verilen S235JR seçilmiştir. Numuneler 30x60 mm boyutlarında haddelme yönünde, hidrolik makas ile kesilerek hazırlanmıştır. Kesme sonucunda oluşan çapaklar temizlenmiştir.

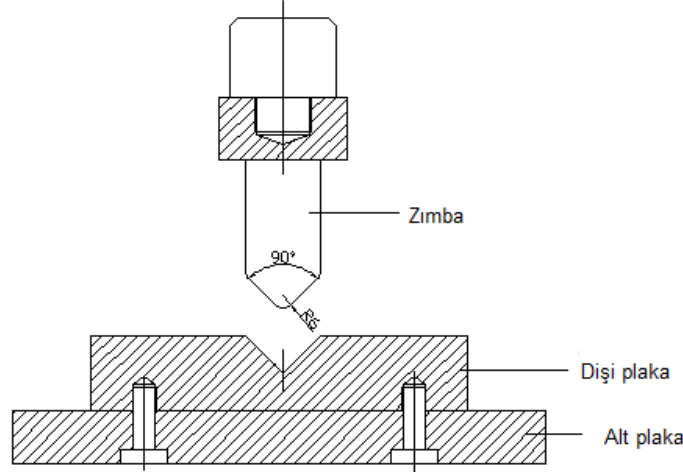
Çizelge 1. Numunenin ağırlıkça kimyasal kompozisyonu

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Co	Ni	Mo	Cu	Ti	V	Nb	W
0.059	0.263	0.702	0.017	0.004	0.0005	0.021	0.007	0.037	0.005	0.06	0.002	0.002	0.001	0.005

Deneyler, malzemeye uygulanan ısıt işlemler açısından 3 yöntemle gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan yöntemlerinden birincisi olan, ısıt işlemsiz bükme işleminde, numune üzerine herhangi bir işlem uygulanmamıştır. İkinci yöntem olan normalizasyon işleminde, numuneler, 920°C'ye kadar ısıtılmış ve daha sonra serbest havada oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır [20]. Üçüncü yöntem (Menevişleme işlemi) için ise, numuneler, 880°C'ye kadar ısıtılmış, sıcaklığı 20-40°C

olan saf su içerisine daldırılmıştır. Su verilen parçanın tamamen soğuması çatlamaya sebep olması nedeniyle, numuneler 60-80°C sıcaklığa düştükten sonra, menevişleme işlemi için tav fırınına yerleştirilmiştir. Numuneler, 400°C sıcaklığındaki tav fırınında, 10 ve 30 dk menevişleme sürelerinde bekletilerek tav fırınından alınmış ve soğumaya bırakılmıştır. Deneysel çalışmada numuneler, ısıtılıp işlemsiz, normalize ve menevişlenmiş (10 ve 30 dk) olarak hazırlandıktan sonra, oda sıcaklığında bükme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmada kullanılan bükme kalıbının erkek zımbası ve dişi kalıbı C1390 makas çeliğinden, CNC Dik İşleme merkezinde hassas olarak imal edilmiştir. Bükme kalıbı malzemesinde, darbeden dolayı çatlama ve kırılma meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, kalıp malzemesinin iç yapısındaki gerilimleri gidermek için menevişleme işlemi uygulanmıştır. Şekil 2’de 90° bükme kalıbı görülmektedir.



Şekil 2. Deneysel çalışmada kullanılan bükme kalıbı

“V” bükme kalıbındaki kuvvet hesabı kuvveti hesabı Eş. 1’e göre yapılmıştır [20].

$$P_b = \frac{C \cdot b \cdot S^2 \cdot \sigma_b}{W} \text{ (Kg)} \quad (1)$$

C: W/T’ ye bağlı bir katsayı olup Eş. 2 ile hesaplanır:

$$C = 1 + \frac{4 \cdot S}{W} \quad (2)$$

P_e, Emniyetli kalıplama kuvveti Eş. 3 ile bulunur:

$$P_e = P_b \times 2 \quad (3)$$

Bu eşitliklerde; P_b, ‘V’ bükme kuvveti (N); P_e, Son bükme kuvveti (N); b, Sac malzeme genişliği (mm); S, Sac malzeme kalınlığı (mm); σ_b, Malzeme çekme mukavemeti (N/mm²); W, Kalıp ağız açıklığı (mm); C, W / T oranına bağlı bir katsayıdır.

4 mm kalınlığındaki S235JR (1.0038) numunelerin 90° bükme işlemleri için hesaplanan bükme kuvveti Çizelge 2’de verilmektedir.

Çizelge 2. S235JR numuneler için hesaplanan bükme kuvvetleri

Malzeme	Büküm Açısı [°]	S [mm]	σ _b [N/mm ²]	b [mm]	C	W [mm]	P _b [N]	P _e [N]
S235JR	90°	4	370	30	1,5	32,23	80865	161729

Bükme işlemleri esnasında, zımba ve kalıp arasına sac kalınlığı kadar boşluk bırakılarak numunenin kesit alanının ezilmesine izin verilmemiştir. Böylece, numunenin ezilerek geri esnemeye olan etkisi engellenmiştir. Deneyler, zımba inme hızı 20 m/s de gerçekleştirilmiştir.

Deney serilerinde, 30x60 mm ebatlarında 80 adet numune ısıtılı işlemsiz, normalize, 10 ve 30 dk menevişleme işlemi uygulanarak bükülmüştür. Bükme parametreleri Çizelge 3'de gösterilmektedir. Her deney 10 kez tekrarlanmıştır. Ayrıca, deney serilerinden çıkan sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Isıtılı işlemsiz, normalize ve menevişleme işlemi sonrasında, zımbanın kalıp üzerinde beklemeden ve 30 sn bekletildikten sonra kaldırıldığı uygulamalarda, zımba uç yarıçapı R6 mm için ileri esneme grafikleri oluşturulmuştur.

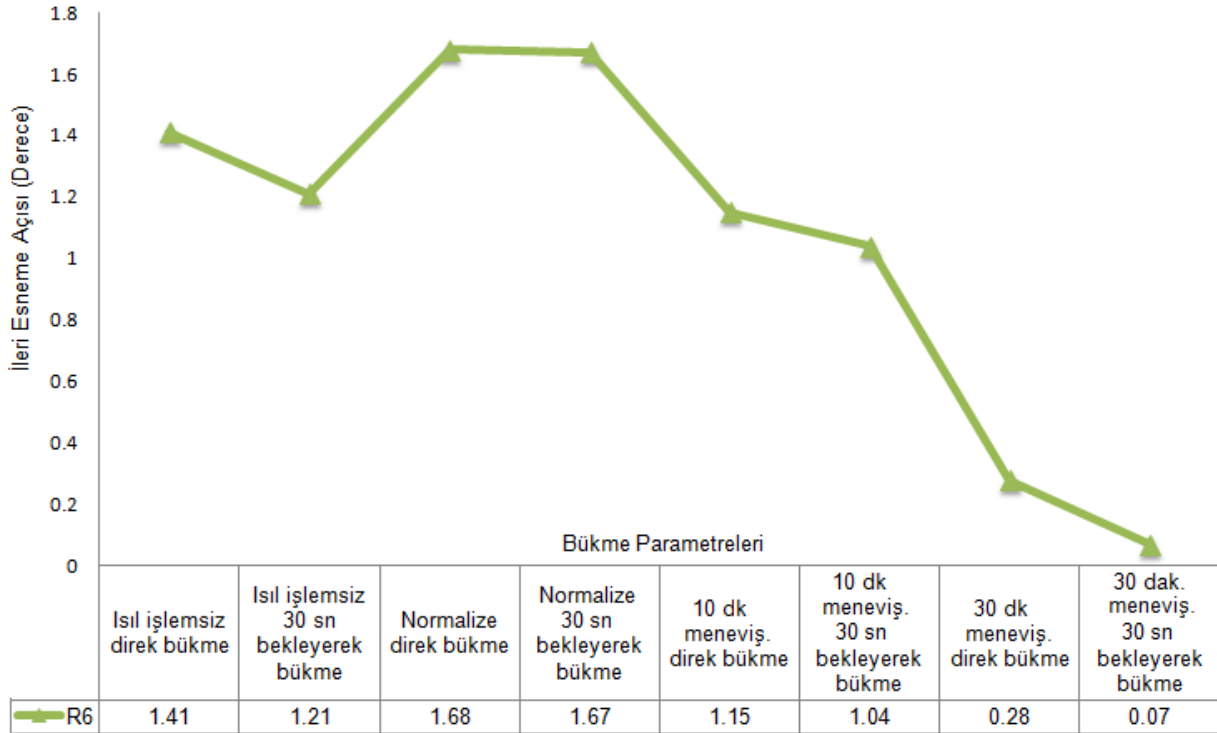
Çizelge 3. Deneysel çalışmada kullanılan bükme parametreleri

Bükme zımbası uç yarıçapı [R] [mm]	Bükme Parametreleri							
	Isıtılı işlemsiz		Normalize		10 dk meneviş.		30 dk meneviş.	
	Direk	30 sn	Direk	30 sn	Direk	30 sn	Direk	30 sn
	Bükme Açısı							
	90°							
6								

Bükme işlemleri sonucunda elde edilen numuneler, açıölçerle ön bir ölçme işlemine tabi tutulmuş ve daha sonra her bir parça "1 dakika hassasiyetindeki" Profilometre kullanılarak hassas olarak ölçülmüştür. Bu sayede ölçmede meydana gelebilecek hata en aza indirilmiş ve sonuçların güvenilirliği sağlanmıştır.

3. Deney Sonuçları

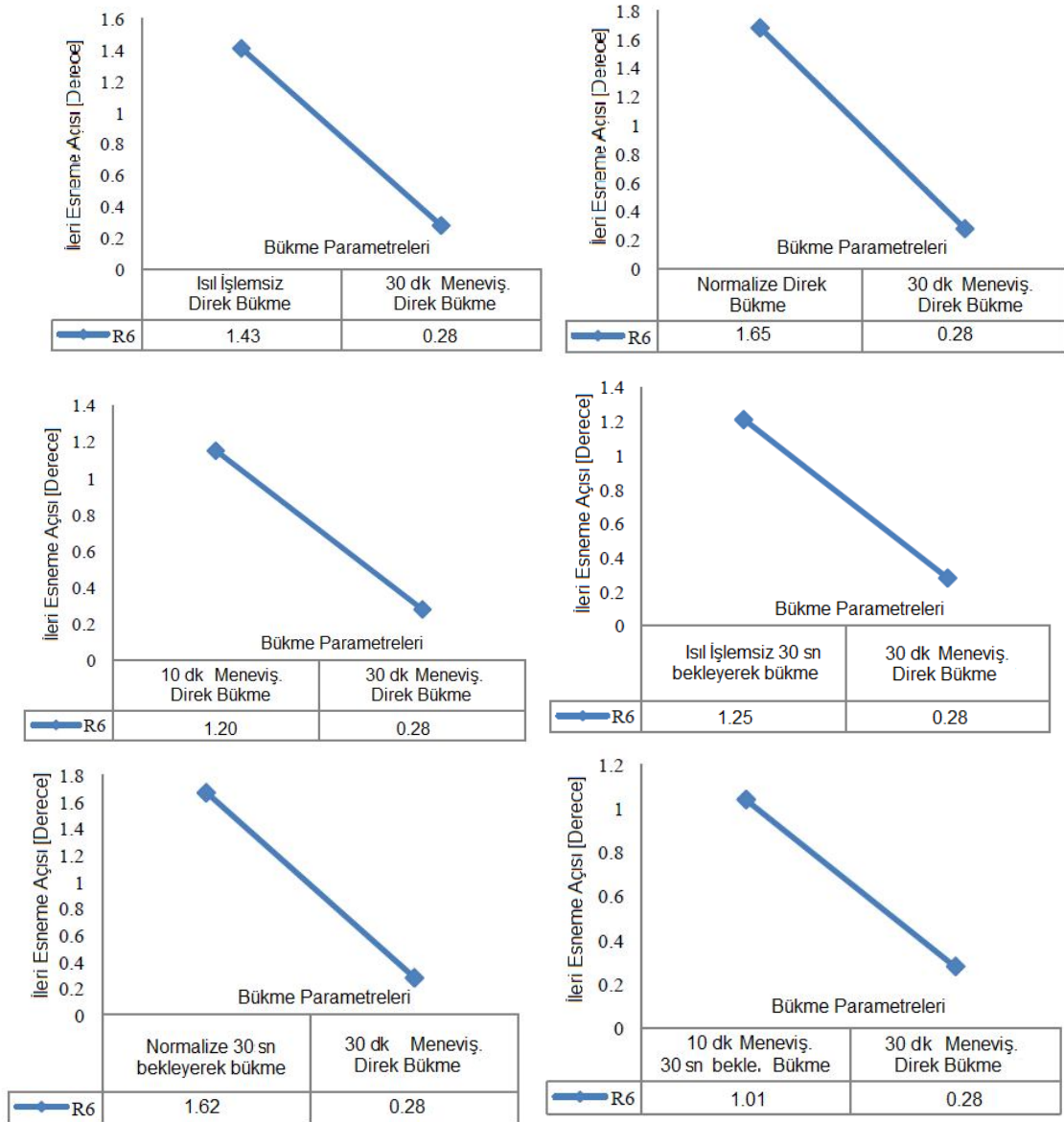
4 mm kalınlığındaki S235JR numunelere, ısıtılı işlemsiz, normalize ve menevişleme (10 ve 30 dk) işlemi uygulayarak, zımba uç yarıçapı R6 mm olan kalıp ile 90° bükülmesi sonucunda, elde edilen ileri esneme miktarları ve grafikleri Şekil 3'te toplu olarak verilmektedir.



Şekil 3. Farklı bükme parametrelerinde elde edilen ileri esneme grafiği ve miktarları

Şekil incelendiğinde, bükme işlemi sonucunda elde edilen ileri esneme değerleri, ısılsız işlemli direk bükme işleminde 1.41° , 30 sn bekletilerek bükülmesinde 1.21° , normalize edilmiş numunenin direk ve 30 sn bekletilerek bükülmesi neticesinde, 1.68° , 1.67° , 10 dk menevişlenmiş numunenin direk ve bekletilmesi neticesinde, 1.15° , 1.04° , 30 dk menevişleme işlemi uygulanmış numunelerin direk bükülmesinde 0.28° , 30 sn bekletilmesi neticesinde ise 0.07° olarak elde edilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde, normalize işlemlerinde en fazla ileri esneme elde edildiği tespit edilmiştir. Menevişleme işlemlerinin ısılsız işlemli bükme ve normalize işlemlerine göre, ileri esneme miktarlarının az olduğu görülmektedir. Menevişleme süresinin artmasının ileri esneme miktarını düşürdüğü görülmektedir.

30 dk menevişlenerek direk bükülen numunelerin, zımba bekletilmeden ve 30 sn bekletilerek yapılan bükme işlemlerine (ısılsız işlemli, normalize ve 10 dk menevişlenmiş numunelere) göre, ileri esneme değerlerinin mukayesesi Şekil 4'te verilmektedir.

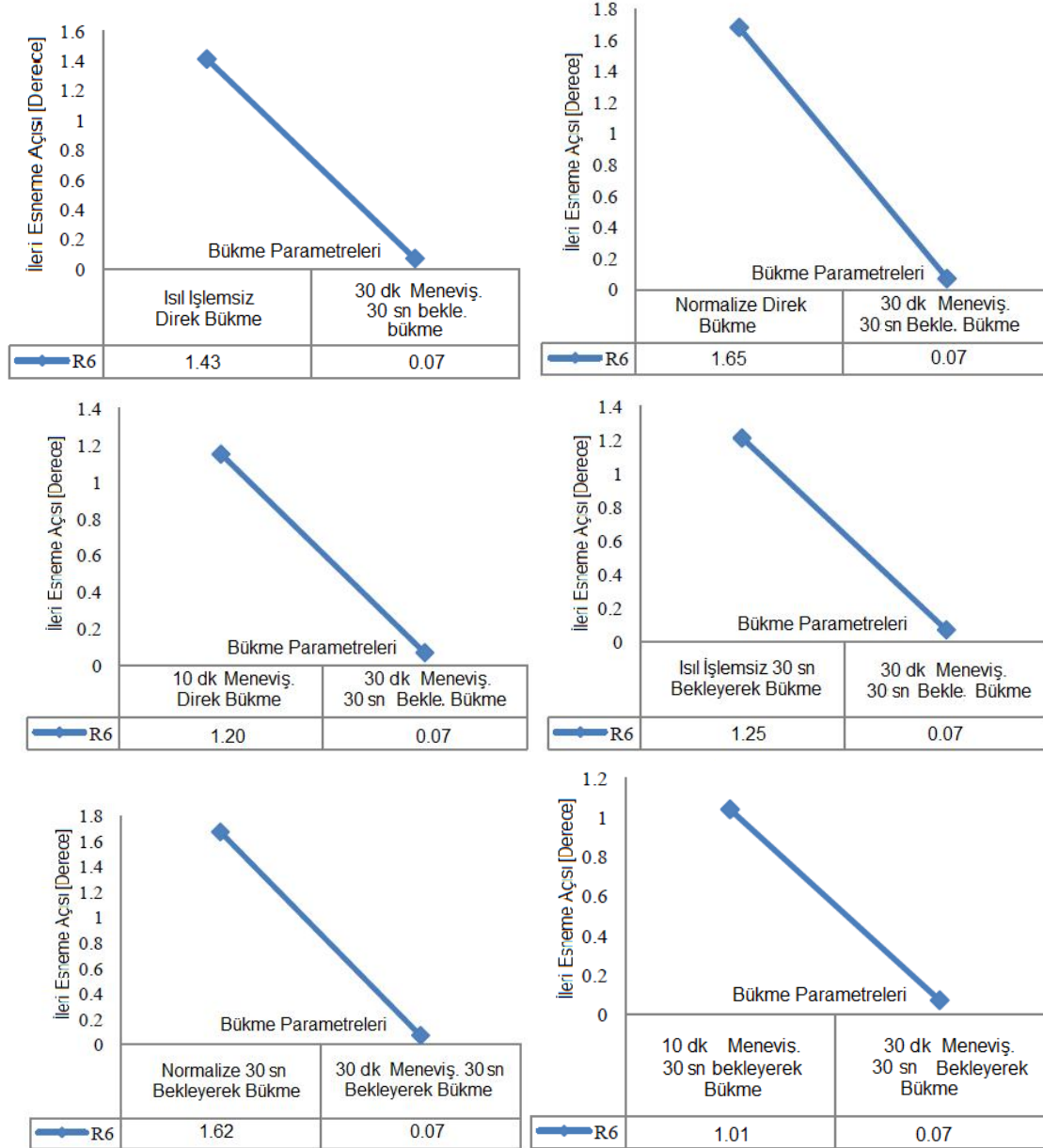


Şekil 4. 30 dk menevişlenerek direk bükülen numunelerin, bükme parametrelerine göre karşılaştırılması

Şekil 4 incelendiğinde, 30 dk menevişlenmiş numuneler ile zımba bekletilmeden yapılan bükme işlemleri karşılaştırıldığında, ısılsız işlemli bükme işlemine %80.42, normalize %83.03 ve 10 dk menevişleme işlemine ise, %76.66'lık ileri esneme miktarlarında azalma meydana gelmektedir.

Zimbanın 30 sn bekletilerek yapılan bükme işlemlerinde ise, Şekil 4'te verilen 30 dk menevişleme işlemi, ısılsız işleme %77.60, normalizasyonlu %82.71 ve 10 dk menevişlenmiş numuneye göre ise, %72.27 ileri esneme değerlerinde azalma tespit edilmiştir.

30 dk menevişleme işlemi uygulanan ve zimbanın numune üzerinde 30 sn bekletildiği deneylerin, bükme parametreleri (ısılsız işleme, normalize ve 10 dk menevişlenmiş) ile kıyaslanması Şekil 5'te verilmektedir.



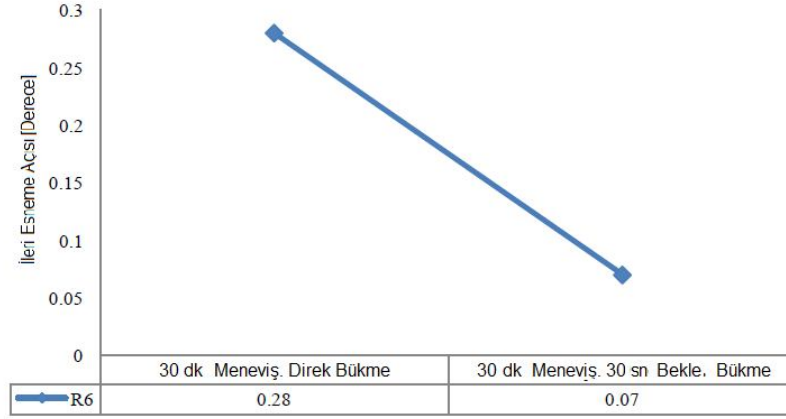
Şekil 5. 30 dk menevişlenerek 30 sn bekletilip bükülen numunelerin, bükme parametrelerine göre karşılaştırılması

Şekil 5'te verilen grafiklere göre, 30 dk menevişlenip zimbanın numune üzerinde 30 sn bekletildiği deneylerin ısılsız işleme, normalize ve menevişlenmiş numuneler ile karşılaştırıldığında, ısılsız işleme %95.10, normalize işlemine %95.75, menevişleme işlemine göre ise %94.16 ileri esneme miktarlarında azalma meydana gelmiştir.

30 dk menevişlenmiş ve zimbanın bekletilmediği deneylerin, zimbanın 30 sn bekletildiği bükme parametreleri ile kıyaslandığında ise, ısılsız işleme %94.4, normalize işlemine %95.67

ve 10 dk menevişlenmiş numunelere göre ise %93.06 ileri esneme miktarlarında düşüş meydana gelmiştir.

S235JR numunenin 30 dk menevişlenmesi neticesinde, zımba bekletilmeden ve 30 sn bekletilerek yapılan bükme işlemi neticesinde, elde edilen ileri esneme miktarlarının mukayesesi Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6. 30 dk menevişlenmiş numunelerin zımba bekletilmeden ve 30 sn bekletilerek bükülmesi sonucu elde edilen verilerin kıyaslanması

Şekil incelendiğinde, 30 dk menevişlenmiş numunelerin zımba bekletilmeden yapılan deneylerde 0.28° , zımba numune üzerinde 30 sn bekletilerek yapılan deneyler sonucunda ise, 0.07° ileri esneme meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 6'ya göre 30 dk menevişlenmiş numunede; 30 sn bekletilerek gerçekleştirilen bükme işlemi, direk bükme işlemine göre ileri esneme miktarında %75'lik bir azalma meydana getirmektedir.

4. Sonuçlar ve Değerlendirme

4 mm kalınlığındaki S235JR numunenin, 90° 'de zımba yarıçapı (R6 mm) ile bükülmesi neticesinde elde edilen deneysel sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- Bükme işlemlerinde, numune özellikleri ve bükme parametrelerinden dolayı ileri esneme tespit edilmiştir.
- Isıl işlemsiz numuneler üzerine uygulanan normalize işleminin ileri esneme miktarını artırdığı, menevişleme işleminin ise azalttığı tespit edilmiştir.
- Zımbanın numune üzerinde bekletilme süresi ileri esnemeyi etkilemektedir. Elde edilen sonuçlara göre, zımba bekleme süresi ileri esnemenin azalmasına neden olmaktadır.
- Bükme işleminde, numune üzerine uygulanan menevişleme süresinin artması, ileri esneme miktarını göz ardı edilebilecek kadar düşürdüğü (0.07°) tespit edilmiştir.
- Zımba bekletilmeden 30 dk menevişlenmiş numune, ısı işlemsiz numune bükme işlemine göre, ileri esneme miktarını %80.42, normalize edilmiş numuneye göre, %83.03, 10 dk menevişlenmiş numuneye göre ise, %76.66 azaltmıştır.
- Zımba uç yarıçapı (R6 mm) ile bükme işlemi gerçekleştirdiğinde, zımba numune üzerinde 30 sn bekletilerek yapılan bükme işlemlerinde, 30 dk menevişlenmiş numune, ısı işlemsiz bükme işlemine, %94.4, normalize işlemine, %95.67, 10 dk menevişlenmiş numuneye göre ise, %93.06 ileri esneme miktarını azaltmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde katkılarından dolayı Efor Makina [Sanayi Dış Ticaret Ltd. Şti](#)'ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Tekaslan, Ö., Şeker, U., Özdemir, A. (2006). Determining springback amount of steel sheet metal has 0.5 mm thickness in bending dies. *Materials & Design*, 27 (3), p. 251-258.
- [2] Tekaslan, O., Şeker, U., Gezer, N. (2008). Determination of Copper sheet metal in "V" bending dies. *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 23, no. 1, p. 201-238.
- [3] Tekaslan, Ö., Gerger, N., Şeker, U. (2008). Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in "V" bending dies, *Materials & Design*, 29 (5), p. 1043-1050.
- [4] Erdemir Ürün Kataloğu, (2012), Zonguldak, p. 18-20.
- [5] Ouakdi, E.H., Louahdi, R., Khirani, D., Tabourot, L. (2012). Evaluation of springback under the effect of holding force and die radius in a stretch bending test. *Materials and Design*, vol. 35, p. 106–112.
- [6] Sousa, L., Castro, C., Antonio, C. (2006). Optimal design of V and U bending processes using genetic algorithms. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 172, no. 1, p. 35–41.
- [7] Imai, K., Koyama, J., Jin, Y. (2008). High-accuracy V-bending system by real time identifying material property. *Advanced Technology Development Department. Journal of Materials Processing Technology*. Kanagawa, Japan. vol. 201, no. 1-3, p. 193–197.
- [8] Tekiner, Z. (2004). An experimental study of the examination of spring-back of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 145., no. 1, p. 109–17.
- [9] Ozturk F, Toros S, Kilic S. Tensile and spring-back Behavior of DP600 advanced high strength steel at warm temperatures. *J Iron Steel Res Int.*, 2009;16:41–6.
- [10] Leu DK, Hsieh CM. The influence of coining force on spring-back reduction in V-die bending process. *J Mater Process Technol.*, 2008;196:230–5.
- [11] Choi, S.H., Chin, K.G. (2006). Prediction of spring-back behavior in high strength low carbon steel sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 171, p. 385–392.
- [12] Schwarze, M., Vladimirov, I. N., Reese, S. (2011), Sheet metal forming and springback simulation by means of a new reduced integration solid-shell finite element technology. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, vol. 200, p. 454-476.
- [13] Ötö, R., Demirci, H.I., 60°'lik V Bükme kalıbında AA5754 ve AL1050 sac malzemelerin farklı bükme metotları kullanılarak geri esneme miktarlarının tespiti. *International Iron & Steel Symposium*, p. 1006-1013.
- [14] Bakhshi, J., Rahmani, B., Daezade, V., Gorji, A. (2009). The study of spring-back of CK67 steel sheet in V-die and U-die bending processes. *Materials and Design*, vol. 30, no. 7, p. 2410-2419.
- [15] Ragai, L., Lazim, D., Nemes, A. (2005). Anisotropy and spring-back in draw-bending of stainless steel 410: experimental and numerical study. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 166, no. 1, p. 116-127.

- [16]Thipprakmas, S., Rojananan, S. (2008). [Investigation of spring-go phenomenon using finite element method](#). *Materials and Design*, vol. 29, no. 8, p. 1526-1532.
- [17]Thipprakmas, S., (2011). Finite element analysis on the coined-bead mechanism during the V-bending process. *Materials and Design*, vol. 32, p. 4909-4917.
- [18]Thipprakmas S., Phanitwong, W. (2011) Process parameter design of spring-back and spring-go in V-bending process using Taguchi technique, *Materials and Design*, vol. 32 p. 4430–4436.
- [19]Branko, G., Josip, C., Dejan, G. (2010). Effect of spring-back and spring-forward in V-die bending of St1403 sheet metal plates. *Strojarstvo: Journal for Theory and Application in Mech. Engineering*, vol. 52, no.2, p. 181-186.
- [20]Ozdemir, M. (2011). The Experimental investigation of spring-back of S235JR sheet metals within bending die. M.Sc. Thesis. *Gazi University, Institute of Science and Technology*.